

城市轨道交通车辆辅助供电系统研究及其发展趋势

尚志坚

(西安市轨道交通集团有限公司运营分公司, 710018, 西安 // 高级工程师)

摘要 城市轨道交通车辆辅助供电系统是保障列车安全稳定运行和乘客出行体验的重要装置。针对传统工频隔离型辅助供电系统装置体积和重量大的缺点,提出了一种前级采用串入并出 Boost 级联 LLC(电感-电感-电容)谐振变换器,以兼顾宽范围电压输入能力和软开关特性,后级采用三相四桥臂逆变器多机下垂并联控制,以实现集中式供电和带不平衡负载能力的系统架构。此举对城市轨道交通车辆的轻量化设计目标有较大意义。此外,还结合电力电子领域的前沿技术,探讨了未来辅助供电系统的发展趋势及相关的技术难题。

关键词 城市轨道交通车辆; 辅助供电系统; 集中式供电; 谐振变换器; 三相四桥臂逆变器

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.041

Research and Development Trend of Auxiliary Power Supply System for Urban Rail Transit Vehicles

SHANG Zhijian

Abstract Auxiliary power supply system of urban rail transit vehicles is an important part to ensure vehicle safe operation and passenger travel experience. Targeting the shortcomings of large volume and weight of the conventional line-frequency based isolated auxiliary power supply system, a new system architecture, where the front stage adopts 'series input and parallel output' Boost cascade LLC resonant converter, to ensure the wide range of input voltage and soft switching characteristics, and the rear stage adopts three-phase four-leg inverter droop control, to realize centralized power supply, with unbalanced load capacity. It has significant meanings to the goal of lightweight design of urban rail transit vehicles. In addition, considering the cutting-edge technology in the field of power electronics, the development trend and related technical difficulties of auxiliary power supply system are discussed.

Key words urban rail transit vehicle; auxiliary power supply system; centralized power supply; resonant converter; three-phase four-leg inverter

Author's address Operation Branch of Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710018, Xi'an, China

城市轨道交通牵引供电系统总能耗主要包括牵引供电能耗和辅助供电能耗。其中辅助供电能耗占总能耗的 30% ~ 40%^[1]。为助力我国早日实现“双碳”目标,开展城市轨道交通车辆辅助供电系统轻量化设计和节能方案研究,对系统能耗优化具有重要意义。

然而,传统辅助逆变器通常采用工频隔离型单级功率变换方案,存在由工频变压器带来的体积大、噪声大、变压器发热严重和零序分量不可控等问题。这有悖于城市轨道交通辅助逆变器的高功率密度和高变换效率的发展趋势。随着功率半导体器件和磁性材料的技术发展,提高变流器工作频率成为降低列车自重、体积和行驶能耗的有效方法。

1 传统工频隔离型辅助供电系统

城市轨道交通车辆辅助供电系统主要功能是将列车从接触网获得的 DC 1 500 V 电流转变成列车所需的 AC 380 V、DC 110 V 及 DC 24 V 电流,如图 1 所示。其中,AC 380 V 负载主要包含空调机组以及照明系统等,DC 110 V 负载主要包含蓄电池和储能电池组等,DC 24 V 负载主要包括控制设备和便携设备等。

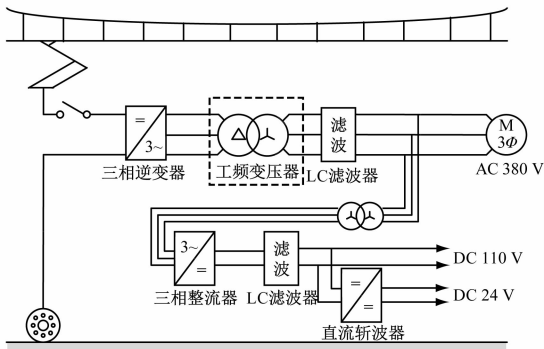


图 1 传统工频隔离型辅助供电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of conventional line-frequency based isolated auxiliary power supply system

传统方案普遍采用“工频逆变 + 变压”的技术,

通过受流器从接触网获得直流电,经过直流滤波、工频逆变、隔离变压器降压和交流滤波,最终输出 AC 380 V,同时通过降压变压器和整流器转换为 DC 110 V,以及通过降压斩波电路转换为 DC 24 V。大功率下工频隔离变压器的质量和体积偏大,因此传统辅助供电系统不利于列车的轻量化设计。

2 前级隔离 DC-DC 高频化

随着功率半导体器件技术的发展,绝缘栅双极晶体管(IGBT)开关频率越来越高,因此可以通过提高变压器工作频率来进行减重。高频化的辅助供电系统从接触网取电之后,经过直流滤波、高频降压斩波、工频逆变和交流滤波后输出 AC 380 V,此外 DC 110 V 和 24 V 也由 700 V 的直流输出变换而来,如图 2 所示。由于传统辅助供电系统中的 2 个工频变压器均被中高频变压器取代,大大提高了系统功率密度。

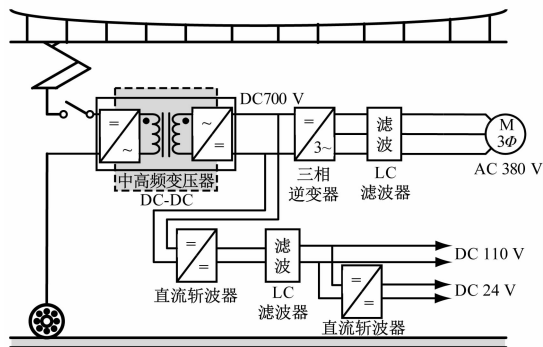


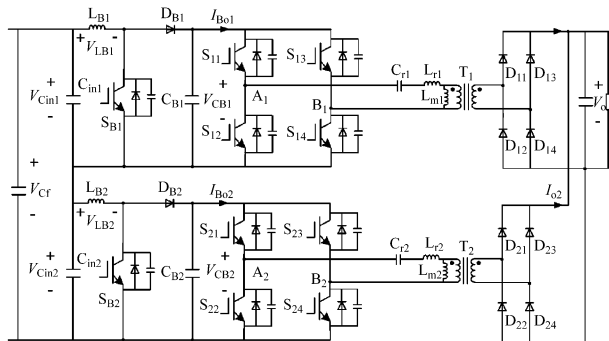
图2 基于中高频变压器的辅助供电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of medium/high frequency transformer based auxiliary power supply system

2.1 高效率宽调压范围的直流变换器解决方案

LLC(电感-电感-电容)谐振变换器因其突出的软开关性能得到了广泛的研究。当其工作频率在谐振频率点附近时,所有开关管均可实现零电压开关(ZVS),且变压器副边整流二极管均可实现零电流开关(ZCS),此时开关损耗最低。但考虑到列车实际运行工况,需通过调频控制来应对宽范围的输入电压,这需要在谐振回路中串入较大的谐振电感。这极大地增加了磁件损耗以及调压过程中软开关效果变差引起的器件损耗,不利于 LLC 变换器工作频率的提升。因此,在 LLC 电路前级加入稳压电路很有必要。传统 Boost 电路具有调压能力好的特点,将其作为前级,利用闭环控制输出电压恒定;

后级级联 LLC 谐振变换器并采用固定工作频率控制,让其工作在谐振频率点附近,以达到最好的软开关效果^[2]。因此,应用像 Boost + LLC 这种将两个变换器级联的拓扑成为了解决宽范围调压和兼顾效率的趋势,如图 3 所示。除了 Boost 电路之外,还可以采用三电平 Boost 等拓扑用来降低器件应力和成本。



注:V表示电压;I表示电流;L表示电感;C表示电容;D表示功率二极管;S表示功率开关管;T表示高频变压器;A和B分别表示第一台和第二台谐振变换器。

图3 Boost级联LLC谐振变换器双机串入并出拓扑结构

Fig. 3 Boost cascade LLC resonant converter topology with series input and parallel output structure

2.2 串入并出的拓扑结构

城市轨道交通车辆辅助供电系统输入为 DC 1 500 V,考虑裕量必须采用电压等级为 3 300 V 的 IGBT 模块,开关管工作频率被限制在 5 kHz 以内。考虑到相同的电流流过开关管时,电压等级 3 300 V 的开关管开通损耗是 1 700 V 开关管的 10 倍以上,关断损耗接近 5 倍,导通损耗接近 1.5 倍。因此,当采用输入串联的结构时,应用电压等级为 1 700 V 的 IGBT 模块,工作频率可达 20 kHz。此外,采用输出并联结构可降低副边整流二极管上的导通损耗。

为提高辅助供电系统的功率密度,必须提高变换器工作频率。因此采用双机串入并出的结构,可以选择电压等级低的开关器件来达到设计目标。

3 后级三相四线制逆变器

城市轨道交通车辆交流负载由辅助逆变器进行供电,包括三相 AC 380 V 和单相 AC 220 V。由于三相三线制系统在接入不对称负载时,无法继续输出三相对称电压^[3],因此需采用三相四线制结构来应对三相不平衡问题。

以传统工频隔离型辅助逆变器为例,由于输出

侧存在三角型转星型连接的降压变压器,可以有效抑制由负载不平衡带来的 3 次及其倍数次谐波零序电流。显然,这种方案正在逐渐被淘汰。分裂电容式逆变器通过将直流侧电容中点和交流侧滤波电容中点相连以提供不平衡电流。但这种方案存在由于不平衡电流从中性线流入分裂电容带来的母线电容寿命降低的问题^[4]。此外,这种方案还要求保证中性点电位为零。由于前级采用了 Boost + LLC 串入并出的拓扑,无法实现母线分裂电容中点电位平衡,因此采用三相四桥臂逆变器拓扑来解决三相不平衡问题具有一定的应用前景。

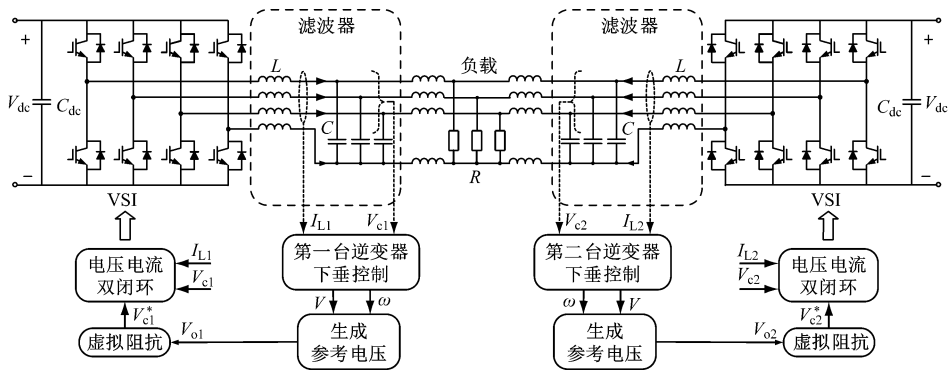
3.1 三相四桥臂逆变器

三相四桥臂逆变器通过在三相三桥臂逆变器的基础上加入第四桥臂,并将三相滤波电容的中点与第四桥臂中点连接,利用该桥臂对零序电流进行控制,从而保证三相负载电压的对称输出。这种方案省去了母线分裂电容,提升了辅助电源设备整体可靠性。四桥臂调制方法主要有两种:三维空间矢量调制(3D-SVM)和三桥臂常规控制加第四桥臂单独调制。

3.2 基于下垂控制的正负零序电流均分

辅助供电系统配置形式分为集中式和分布式。集中式供电指整个城市轨道交通车辆的供电由 2 个逆变器并联共同完成,其中每台逆变器容量在 200 kVA 到 240 kVA 之间。如果其中一台逆变器出现故障,就需要将列车上的一些重要级别不高的用电设备切除。分布式供电指每列车有 4 台辅助逆变器供电,其额定容量一般在 100 ~ 120 kVA 左右。因此,集中式尽管供电冗余较差,但因其结构简单、重量轻和成本低的优势而被广泛应用^[5]。

辅助供电装置后级三相四桥臂逆变器并联结构示意图如图 4 所示。其中,每台逆变器容量为 120 kVA,2 台为 1 组,最后由 2 组共同为整个列车供电。为实现不依赖通信的功率均分和自同步功能,采用基于下垂的并联控制方法。正常情况下,每台逆变器的功率指令相同,经过下垂功率环之后生成参考电压,再经虚拟阻抗算法实现功率解耦,最后由电压电流双环实现控制。由于三相负载不对称会引入零序和负序分量,研究自适应虚拟阻抗设计方法,对于精确地实现各序电流均分很有必要。



注: L 表示电感; R 表示负载; C 表示电容; V_{c1} 、 V_{c2} 表示电容电压; I_{L1} 、 I_{L2} 表示电感电流; V 和 ω 表示参考电压的幅值和相位; V_{o1} 、 V_{o2} 表示参考电压; V_{c1}^* 、 V_{c2}^* 表示经过虚拟阻抗之后的参考电压; VSI 表示电压源逆变器。

图 4 辅助供电系统后级三相四桥臂逆变器并联结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of auxiliary power supply system rear stage three-phase four-leg inverter parallel structure

4 辅助供电系统未来发展趋势

尽管电力电子装置因其控制灵活、设备功能丰富等优势,在辅助供电系统中已经得到了广泛的应用,但仍然存在诸如设备可靠性低,功率密度和效率受限等问题。

4.1 宽禁带器件用以提升系统功率密度

碳化硅器件的出现有望革新下一代电力电子

变换器。相较于传统硅(Si)材料,碳化硅(SiC)材料在禁带宽度、击穿电压、热导率、熔点、电子饱和漂移速度等方面的特性均得到全面提升。这些特性使得 SiC 功率器件具有高击穿电压、高开关频率、高结温和低通态电阻等优势,有利于提高辅助变流器的效率、功率密度、额定功率和可靠性。SiC 器件低导通电阻和快速开关特性降低了器件开关损耗,加上 SiC 器件的高工作温度,可以有效减小冷却装

置尺寸。同时系统工作在高开关频率下,减小了无源滤波元件的质量,因此采用 SiC 器件后辅助变流器的效率和功率密度将会得到提高。此外,高工作频率将会使得辅助变流器具有更高的控制带宽,更好的动态性能和更理想的输出波形质量。

宽禁带半导体器件对电气化交通的进一步推进具有重要意义。在充分发挥 SiC 器件优势的同时,应注意可能存在的电磁干扰、短路保护等问题。这是因为 SiC 器件结电容小,导通电阻小,以及在快速开关瞬态过程中的高 dI/dt 和 dV/dt ,会使得其开关过程比 Si 器件更容易受到电路寄生参数和电磁噪声的影响。

4.2 基于母线电容寿命评估的主动运维方法

尽管大量地应用电力电子设备对辅助供电系统的轻量化设计有积极作用,但较高的复杂度会带来装置可靠性相关问题。其中直流母线电容被认为是最薄弱的环节,工程上通常采取多个铝电解电容串并联的方式,但随着时间推移,其电解液将逐渐蒸发,导致电容特性退化。一般来说,典型电解电容工作在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下寿命一般不超过 7 年^[6]。尽管近些年来,有研究提出采用薄膜电容进行替换,但存在电容容量小、价格高等实际问题。因此,未来的研究应侧重于对电解电容进行可靠性评估,采用主动运维来替代传统的定期运维,为工程问题的解决提供足够的理论依据。

4.3 高频磁性元件的材料选型与优化设计

随着电力电子变压器容量需求不断提高,变压器体积不断增大,可通过提升工作频率的方法减小高频变压器的体积。但工作频率越高,可供散热的表面积随之减小,铁心和绕组的高频损耗也随之迅速增加,导致电能传输效率低下。非晶材料由于兼备硅钢片饱和磁通密度大和铁氧体高频损耗低的优点,被认为是今后发展大容量高频变压器的最佳选择。此外,高频磁性元件的优化设计也至关重要。例如,有研究提出将铁心总损耗与高频变压器视在功率的比值定义为损耗因子,以最低损耗因子水平结合体积与成本因素作为铁心材料选择标准的方法^[7]。

5 结语

为推动城市轨道交通车辆辅助供电系统的轻

量化设计,本文提出了一种前级采用串入并出 Boost 级联 LLC 谐振变换器,后级采用三相四桥臂逆变器多机下垂并联的方案,在降低器件应力、提高效率 and 带不平衡负载能力等方面均有一定提升。此外,本文还展望了辅助供电系统部件未来的发展趋势,如宽禁带半导体器件的应用、母线电解电容的寿命评估和磁性材料的选型,这对优化设计和研究思路具有一定参考意义。

参考文献

- [1] 彭敏,肖晓. 城轨车辆辅助供电系统节能方案研究[J]. 现代城市轨道交通,2020(5):41.
PENG Min, XIAO Xiao. Study on energy saving solutions of auxiliary power supply system for urban rail vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(5):41.
- [2] 姜新生,曾鹏翔,于博洋,等. 轨道交通辅助电源谐振软开关变换器优化设计[J]. 电力电子技术,2021(3):1.
JIANG Xinsheng, ZENG Pengxiang, YU Boyang, et al. Optimal design of resonant soft switching converter of rail transit auxiliary power supply system[J]. Power Electronics, 2021(3):1.
- [3] 朱宏,王伟. 直流电力牵引中不平衡电流及谐波对地铁信号系统的影响[J]. 城市轨道交通研究,2006(1):50.
ZHU Hong, WANG Wei. Influence of unbalanced current from DC traction over metro signal system[J]. Urban Mass Transit, 2006(1):50.
- [4] 朱恺. 地铁辅助电源系统关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
ZHU Kai. Research on auxiliary power system in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [5] 杜求茂,陈中杰,彭驹. 城轨车辆辅助供电系统的比较分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2011(4):53.
DU Qiумao, CHEN Zhongjie, PENG Ju. Comparison and analysis of auxiliary power supply systems for urban rail vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011(4):53.
- [6] 社会卿. 高频脉冲直流环节辅助逆变器输出性能优化与效率提升[D]. 北京:北京交通大学,2016.
DU Huiqing. Output optimization and efficiency improvement of high-frequency pulsating DC-link auxiliary inverter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 韩帅,张黎,谭兴国,等. 基于损耗分析的大容量高频变压器铁芯材料选型方法[J]. 高电压技术,2012(6):1486.
HAN Shuai, ZHANG Li, TAN Xingguo, et al. Material selection based on loss characterization for high-power high-frequency transformer cores[J]. High Voltage Engineering, 2012(6):1486.

(收稿日期:2022-01-18)